第42卷 第3期
2022年6月
桂林电子科技大学学报
Journal of Guilin University of Electronic Technology
Vol. 42, No. 3
Jun. 2022

$CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂的制备、表征及性能测试

周俊峰，钟 燕，黄 涛，桑 湉，胡朝浩

（桂林电子科技大学 材料科学与工程学院，广西 桂林 541004）

摘 要：在固相烧结制备单相 $Sr_2Bi_2O_5$ 的基础上，利用化学沉淀法制备了一系列 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化材料来解决环境污染中的有机污染物问题。采用XRD、SEM、TEM、EDS和XPS进行了复合光催化剂的表征，通过降解亚甲基蓝评估其光催化性能。实验结果表明，$CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂由CdS和 $Sr_2Bi_2O_5$ 两相组成，形貌为团聚状的 $Sr_2Bi_2O_5$ 颗粒并附着在不规则的CdS颗粒上，两相表面紧密接触在一起，形成明显的界线，相互耦合形成异质结；当 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 摩尔比为1/1时，可见光光催化性能最好，40 min降解亚甲基蓝的效率达95%。进一步循环测试发现，复合光催化剂具有良好的稳定性。显著改善的光催化性能主要归因于复合光催化剂中在CdS与 $Sr_2Bi_2O_5$ 之间形成了异质结，在加快光生电子空穴对分离的同时，还有效抑制了光生电子空穴对的复合。

关键词：$CdS/Sr_2Bi_2O_5$；光催化；沉淀法；亚甲基蓝

中图分类号：TB332；X788 **文献标志码**：A **文章编号**：1673-808X(2022)03-0252-07

Preparation, characterization and performance test of $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ composite photocatalyst

ZHOU Junfeng, ZHONG Yan, HUANG Tao, SANG Tian, HU Chaohao

(School of Material Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: On the basis of solid phase sintering to prepare single-phase $Sr_2Bi_2O_5$, a series of $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ composite photocatalytic materials were prepared by chemical precipitation method to solve the problem of organic pollutants in environmental pollution. The composite photocatalyst was characterized by XRD, SEM, TEM, EDS and XPS, and its photocatalytic performance was evaluated by degrading MB. After experiments, it is found that the $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ composite photocatalyst consists of two phases: CdS and $Sr_2Bi_2O_5$. The morphology of agglomerated $Sr_2Bi_2O_5$ particles is attached to the irregular CdS particles, and the surface of the two phases are in close contact with each other, forming an obvious boundary, and forming a heterojunction. When $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ mole ratio is 1/1, the visible photocatalytic performance is the best, the degradation efficiency of MB reached 95% in 40min, and three cycle tests show that the photocatalyst had good stability and repeatability. The significantly improved photocatalytic performance is mainly attributed to the formation of heterojunction between CdS and $Sr_2Bi_2O_5$ phases in the composite photocatalyst, which accelerates the separation of photoelectron-generated hole pairs and effectively inhibits the recombination of photoelectron-generated hole pairs.

Key words: $CdS/Sr_2Bi_2O_5$; photocatalysis; chemical precipitation method; methylene blue

在工业生产过程中会有大量的工业废水产生，而其中有机染料废水比例较大，且随着新型工艺下对染料的改进，使得更多难以降解的有机污染物进入废水，因此增大了处理污染的难度[1]。在处理有机污染的研究过程中发现，相对传统处理方法，采用半导体光催化技术处理有机污染物更高效环保[2]。虽然CdS禁带宽度约2.0 eV，对可见光具有较好的响应，但CdS不稳定，易发生光腐蚀，光生电子和空穴易复合，造成单一CdS体系的光催化活性较低，限制了其实际应用[3]。而铋系光催化剂，如 Bi_2O_3[4]、

收稿日期：2020-12-09
基金项目：广西自然科学基金(2018JJB160017,2019JJA160122)；广西信息材料重点实验室基金(171034-z,1210908-215-z)
通信作者：钟燕(1981—)，女，副教授，博士，研究方向为光催化材料、第一性原理计算。E-mail：yanzhong@guet.edu.cn
引文格式：周俊峰，钟燕，黄涛，等. $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂的制备、表征及性能测试[J].桂林电子科技大学学报，2022，42(3)：252-258.



Bi_2WO_6[5]、$BiVO_4$[6] 等因其在可见光下（400～750 nm）具有良好的光催化活性而得到广泛关注。在众多铋系光催化剂中，$Sr_2Bi_2O_5$ 的结晶度较好，颗粒粒径小且分布均匀，带隙在 2.78 eV 左右，易获得可见光光响应，是一种潜在的理想光催化剂[7]。通过将 2 种不同禁带宽度的半导体复合形成异质结复合光催化剂是改进单一半导体光催化性能的有效途径[8]。

鉴于此，通过在 CdS 体系中添加 $Sr_2Bi_2O_5$ 半导体来构筑异质结，研究 2 种半导体不同配比对复合光催化剂的结构、形貌、光生载流子及光催化活性的影响，以获得一种具有较好光催化性能的复合光催化剂。

1 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂的制备

采用固相烧结法，将一定摩尔比的 $SrCO_3$ 和 Bi_2O_3 球磨 2 h，混合均匀后，放入马弗炉中 780 ℃下煅烧 10 h，得到灰白色 $Sr_2Bi_2O_5$ 粉末。将一定量的 $Cd(NO_3)_2\cdot 4H_2O$ 和 $Na_2S\cdot 9H_2O$ 分别溶解在 30 mL 去离子水中，搅拌 15 min 后分别形成溶液 I 和溶液 II，再将溶液 II 缓慢加入溶液 I 中，加入过程中将一定量的 $Sr_2Bi_2O_5$ 加入溶液 I，并持续搅拌 30 min，形成橙黄色悬浊液。用去离子水和无水乙醇对悬浊液进行抽滤后，在 60 ℃干燥 12 h，得到一系列不同摩尔比的 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 样品。

2 结果与讨论

2.1 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 晶体结构与组成

图 1 为单相 CdS、$Sr_2Bi_2O_5$ 和不同摩尔比合成的 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 系列复合材料的 XRD 图谱。

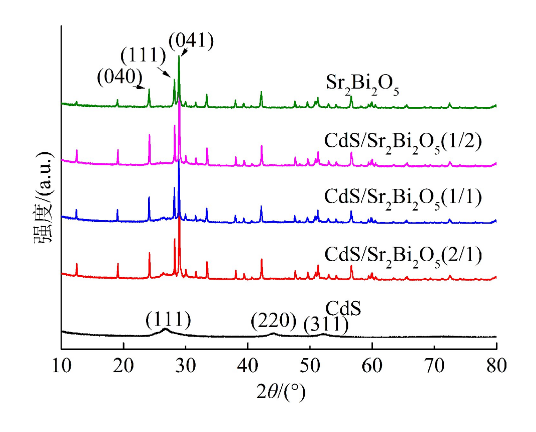


图 1 单相 CdS，$Sr_2Bi_2O_5$ 和 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂的 XRD 图谱

从图 1 可看出，单相的 CdS 属于闪锌矿结构，其三强峰位于 2θ=26.980°、44.780°和 53.059°处，分别对应于 CdS(111)、(220) 和 (311) 晶面，这与 CdS 的 JCPDS 标准卡片（JCPDS No. 65-8873）完全吻合[9]；单相的 $Sr_2Bi_2O_5$ 样品的三强峰则出现在 2θ 为 24.860°、28.112°和 28.814°，分别对应 $Sr_2Bi_2O_5$ 的（040）、（111）和（041）晶面，与具有正交结构的 $Sr_2Bi_2O_5$ 标准卡片（JCPDS No. 81-0516）相一致[10]；所有特征衍射峰均由 CdS＋$Sr_2Bi_2O_5$ 两相组成，衍射峰的形状狭窄尖锐，且无其他杂质峰出现，表明成功合成了结晶度较高的 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂。

为了探讨合成的 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$（1/1）复合光催化剂的化学成分和氧化状态，通过实验进一步研究其 XPS 光谱。图 2(a) 为 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$（1/1）复合光催化剂的全光谱，检测到含有 Cd、S、Sr、Bi、O 和 C 六种元素，这些元素符合测试样品的元素组成，而 C 1 s 峰主要来自 XPS 仪器自带的含碳化合物。图 2(b) 中，结合能为 405.1 eV 的峰对应 CdS 中 Cd^{2+} 的 Cd $3d_{5/2}$ 电子轨道；结合能为 411.8 eV 的峰对应于 CdS 中 Cd^{2+} 的 Cd $3d_{3/2}$ 电子轨道。图 2(c) 中的 S 2p 光谱显示出在结合能分别为 161.6、162.6 eV 处存在 2 个峰，分别对应 S $2p_{3/2}$、S $2p_{1/2}$ 电子轨道，表明 S 元素在复合光催化剂中以 S^{2-} 的形式存在，这与文献[11]测试结果一致。图 2(d) 中，结合能为 131.0 eV 的峰对应于 $Sr_2Bi_2O_5$ 中 Sr^{2+} 的 Sr $3d_{5/2}$ 电子轨道，结合能为 132.6 eV 的峰对应于 $Sr_2Bi_2O_5$ 中 Sr^{2+} 的 Sr $3d_{3/2}$ 电子轨道，表明 Sr 在样品中的价态为 Sr^{2+}，这与 $SrCO_3$ 的测试结果完全一致[12]。图 2(e) 中，Bi $4f_{7/2}$ 电子轨道对应的结合能约为 156.5、159.2 eV；Bi $4f_{5/2}$ 电子轨道对应的结合能为 161.9、164.6 eV。图 2(f) 中 O 1 s 的 XPS 图谱由结合能为 531.0、529.1 eV 的 2 个峰组成，分别对应于化学吸附和晶格氧（Bi—O 或 Sr—O 键），这与文献[13-14]的 $MgBi_2O_6$ 和 $(Sr_{0.6}Bi_{0.305})_2Bi_2O_7$ 的结论一致。

2.2 形貌分析

$CdS/Sr_2Bi_2O_5$（1/1）复合光催化剂更为详细的微观形貌和相结构可采用透射电镜（TEM）和高分辨率透射电镜（HRTEM）来表征，其结果如图 3、4 所示。图 3(a)～(b) 表明 $Sr_2Bi_2O_5$ 是由大小约为 300～700 nm 的均匀小颗粒团聚成的不规则颗粒。如图 3(c) SEM 所示，CdS 颗粒大小尺寸约为 2 ～10 μm，表面粗糙，呈絮状分布，且结晶度较差。单相呈现的形貌结晶度与先前 XRD 分析结果一致。。对比图 3(a)～(c) 可看出，$CdS/Sr_2Bi_2O_5$（1/1）复合光催化剂由 CdS 和 $Sr_2Bi_2O_5$ 两相颗粒组成，且 CdS 和 $Sr_2Bi_2O_5$ 颗粒的大小和形状基本保持不变，而 CdS



强度/(a.u.)
O C Cd 3d C S 2p Bi 4f Sr 3d
550 500 450 400 350 300 250 200 150 100
结合能/eV
(a) 所有元素全谱图

强度/(a.u.)
411.8 405.1
425 420 415 410 405 400
结合能/eV
(b) Cd 3d的XPS谱图

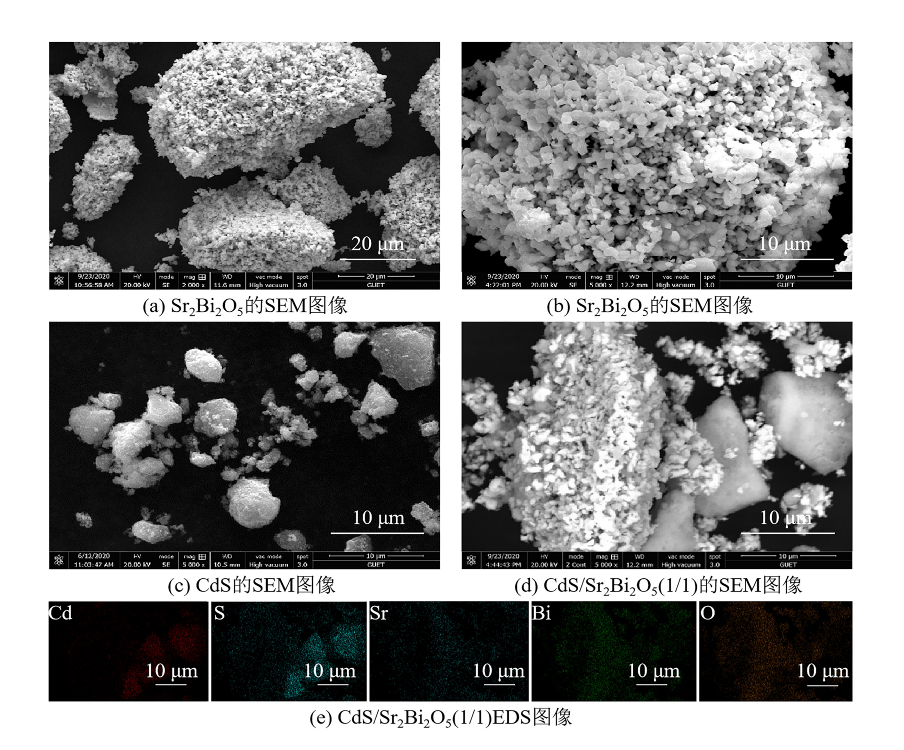
强度/(a.u.)
162.6 161.6
175 170 165 160
结合能/eV
(c) S 2p的XPS谱图

强度/(a.u.)
132.6 131.0
145 140 135 130 125
结合能/eV
(d) Sr 3d的XPS谱图

强度/(a.u.)
164.6 161.9 159.2 156.5
170 165 160 155 150
结合能/eV
(e) Bi 4f的XPS谱图

强度/(a.u.)
531.0 529.1
550 545 540 535 530 525
结合能/eV
(f) O 1s的XPS谱图

图 2 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)的 XPS 图谱



(a) $Sr_2Bi_2O_5$的SEM图像 (b) $Sr_2Bi_2O_5$的SEM图像

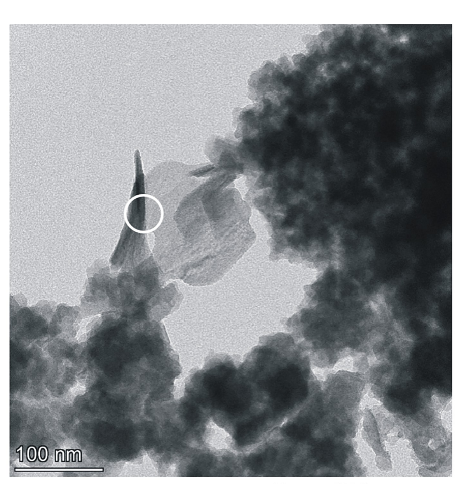
(c) CdS的SEM图像 (d) $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)的SEM图像

(e) $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)EDS图像

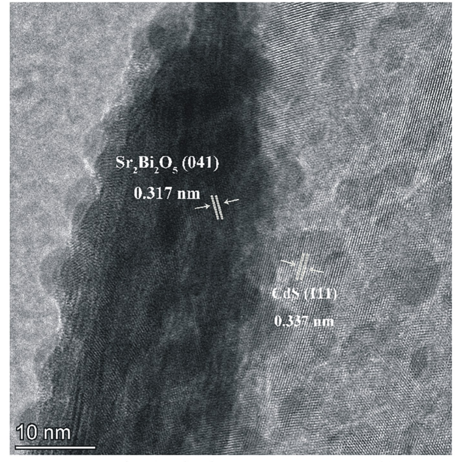
图 3 单相的 SEM 图像以及 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)的 SEM 和 EDS 图像

和 $Sr_2Bi_2O_5$ 颗粒的表面则相互耦合。

从图 4(a)可观察到不规则的 $Sr_2Bi_2O_5$ 颗粒与 CdS 颗粒紧密结合在一起,说明它们之间存在强烈的相互作用,在 $Sr_2Bi_2O_5$ 和 CdS 两相界面形成了异质结,使得复合体系颗粒的表面接触面积增加,从而产生比单相更多的活性位点,这将有利于促进复合光催化剂电荷的分离,提高其光催化性能。从图 4(b)可看到 $Sr_2Bi_2O_5$ 和 CdS 的不同晶格条纹,晶面间距为 0.337 nm 的晶格条纹对应于 CdS 的(111)晶面,而晶面间距为 0.317 nm 的晶格条纹则与 $Sr_2Bi_2O_5$ 的(041)晶面相匹配,与 XRD 数据吻合。



(a) $CdS/Sr_2Bi_2O_5(1/1)$的TEM图像



(b) (a)中圈出部分$CdS/Sr_2Bi_2O_5(1/1)$的HRTEM图像

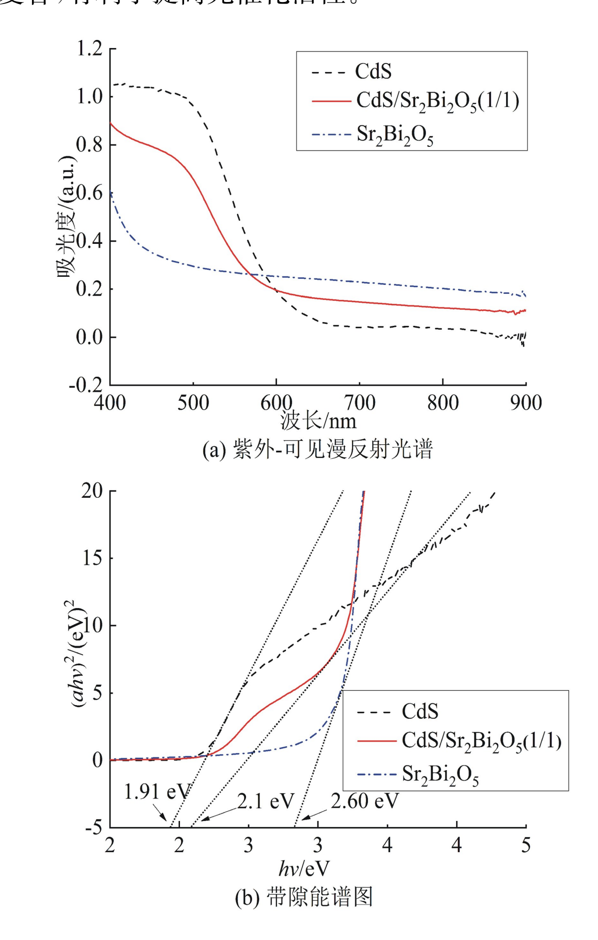
图 4 $CdS/Sr_2Bi_2O_5(1/1)$的透射电镜图像

2.3 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂的光学性质

为了确定复合光催化剂的禁带宽度,对半导体的光吸收特性进行了测试。图 5 为 CdS、$Sr_2Bi_2O_5$ 和 $CdS/Sr_2Bi_2O_5(1/1)$复合光催化剂的 UV-vis 漫反射光谱。图 5(a)中 CdS、$Sr_2Bi_2O_5$ 和 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂的光吸收波段均大于 400 nm,表明这 3 种样品的光吸收区域在可见光范围内。图 5(b)为样品的$(ah\upsilon)^2-h\upsilon$ 曲线图。根据光吸收特性的结果,样品的带隙值 E_g 采用公式

$$ah\upsilon = A(h\upsilon - E_g)^{n/2}\text{[15]} \quad (1)$$

进行计算,其中:a 为光吸收系数;h 为普朗克常量;υ 为频率;A 为比例常数。n 的取值与半导体的电子跃迁有关,间接半导体的 $n=4$,直接半导体的 $n=1$。由式(1)可算得 CdS、$CdS/Sr_2Bi_2O_5(1/1)$、$Sr_2Bi_2O_5$ 的 E_g 分别为 1.91、2.10、2.60 eV。根据图 5(b)中 x 轴的截距也可估算出 CdS、$CdS/Sr_2Bi_2O_5(1/1)$和 $Sr_2Bi_2O_5$ 的 E_g,与实验计算结果[16]一致。CdS 有较小的 E_g,因此对可见光响应区间较宽,但光生电子和空穴容易重组;$Sr_2Bi_2O_5$ 的 E_g 较大,对可见光响应较弱,光催化效率较低;而当 CdS 和 $Sr_2Bi_2O_5$ 复合形成 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复光催化剂后,得益于复合材料中异质结的存在,其紫外可见漫反射光谱发生了红移,E_g 相对于单相变大,有效抑制了光生电子和空穴的复合,有利于提高光催化活性。



(a) 紫外-可见漫反射光谱

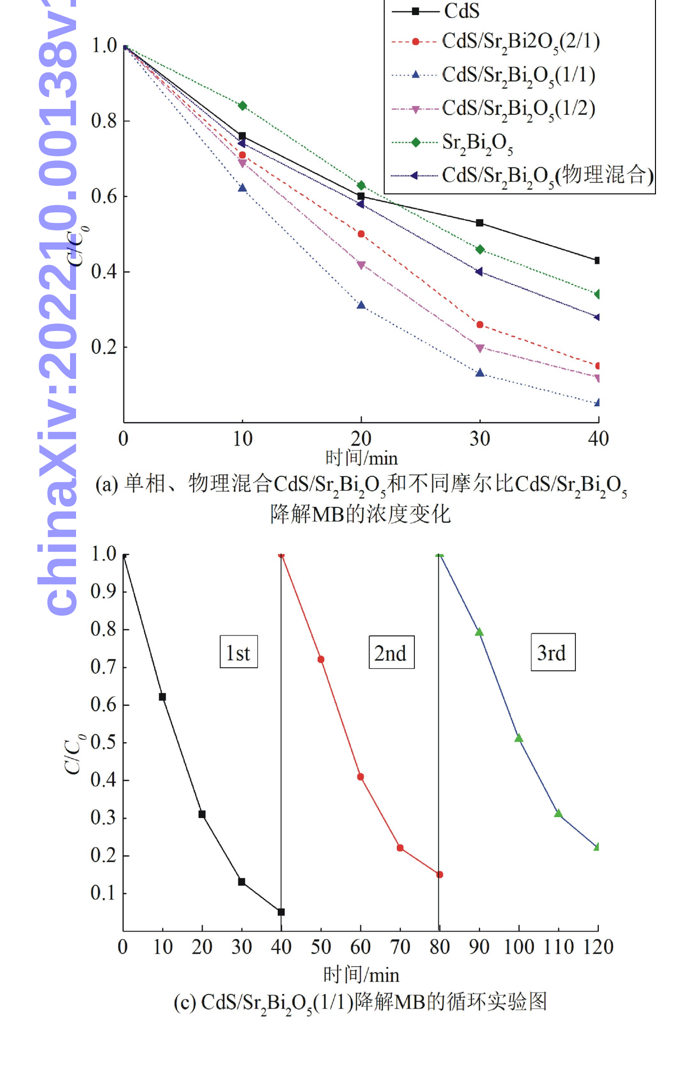
(b) 带隙能谱图

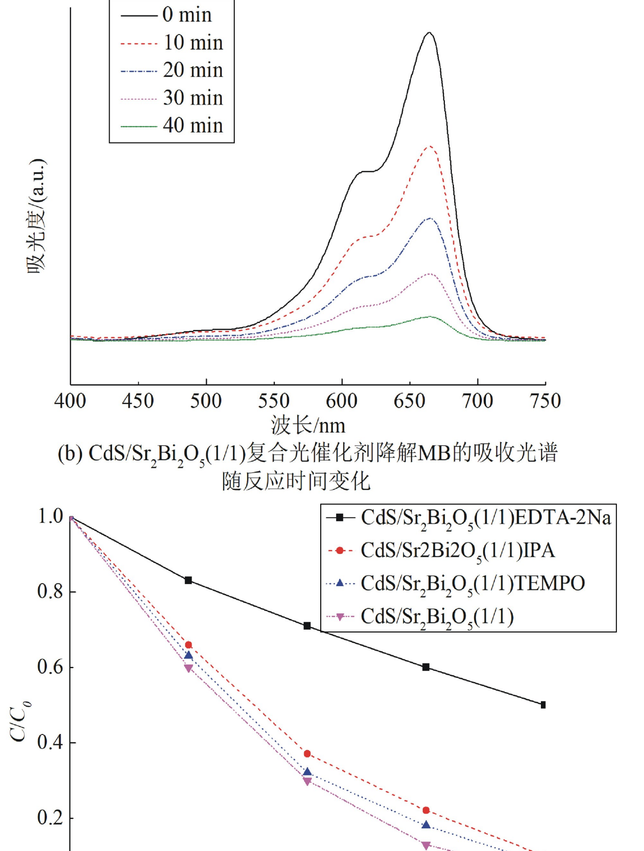
图 5 CdS,$Sr_2Bi_2O_5$ 和 $CdS/Sr_2Bi_2O_5(1/1)$复合光催化剂的紫外可见漫反射光谱和带隙能谱图

2.4 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂的光催化性能

图 6 为在模拟可见光光源下降解 MB 评价样品

的光催化活性。先将 0.05 g 样品加入 MB 溶液，放入暗室中搅拌 30 min，使混合溶液达到吸附脱附的平衡状态后进行可见光降解实验。图 6(a)中，光照 40 min 后，$CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)对 MB 的降解效率达 95%，分别比 CdS、$CdS/Sr_2Bi_2O_5$(2/1)、$CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/2)和 $Sr_2Bi_2O_5$ 提高 38%、10%、7%和 29%。另外，物理混合的 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)样品的光催化活性明显低于化学沉淀法制备的 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)异质结光催化剂，表明光催化活性的提高主要来自 CdS 与 $Sr_2Bi_2O_5$ 界面耦合产生异质结的作用。在图 6(b)中，随着光照时间的变化，MB 溶液的最强特征吸收峰强度逐渐降低，最终由蓝色变成透明溶液，说明染料被完全降解，这表明对 MB 的降解是由光催化驱动的，其中 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)的性能最好。图 6(c)中 MB 的 3 次循环实验评价了 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)复合光催化剂的稳定性和可重复使用性，3 次循环后降解率为 80%，表明 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)复合光催化剂具有良好的稳定性。通过捕获剂实验探究在光催化降解过程中是何种活性物质起主要作用。常见的捕获剂主要有 EDTA-2Na、TEMPO 和 IPA，分别作为 h^+、$\cdot O_2^-$ 和$\cdot$OH 的清除剂[17]。图 6(d)为在添加不同捕获剂时 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)对 MB 的降解效果。使用 EDTA-2Na 可显著抑制 MB 的降解效率，而 TEMPO 和 IPA 的添加对降解 MB 几乎无影响，表明 h^+ 是主要的活性物质。





(a) 单相、物理混合$CdS/Sr_2Bi_2O_5$和不同摩尔比$CdS/Sr_2Bi_2O_5$降解MB的浓度变化

(b) $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)复合光催化剂降解MB的吸收光谱随反应时间变化

(c) $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)降解MB的循环实验图

(d) $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)捕获剂实验对比图

图 6 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 光催化剂的光催化性能

2.5 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂的光催化机理

为了研究复合光催化剂中光生电子和空穴的迁移过程，对具有良好光催化活性的 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)复合光催化剂进行了瞬态光电流和电化学阻抗测试。图 7(a)为 CdS、$CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)和 $Sr_2Bi_2O_5$ 的瞬态光电流图谱，其中 CdS 的光电流最小，$CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)复合光催化剂的光电流最大。瞬态光

电流可间接反映电子空穴分离效率，光电流密度大的催化剂光生电子空穴对的分离效率通常较高。$CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)具有更大的光电流密度，说明复合光催化剂中异质结发挥了作用，可有效分离光生载流子，所以其光催化性能比单相有大幅提升。同时，通过图 7(b)的电化学阻抗谱图谱发现，$CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)复合光催化剂的半圆半径比单相 CdS 和单相 $Sr_2Bi_2O_5$ 半圆半径小，说明复合材料的光诱导载流子重组率降低。

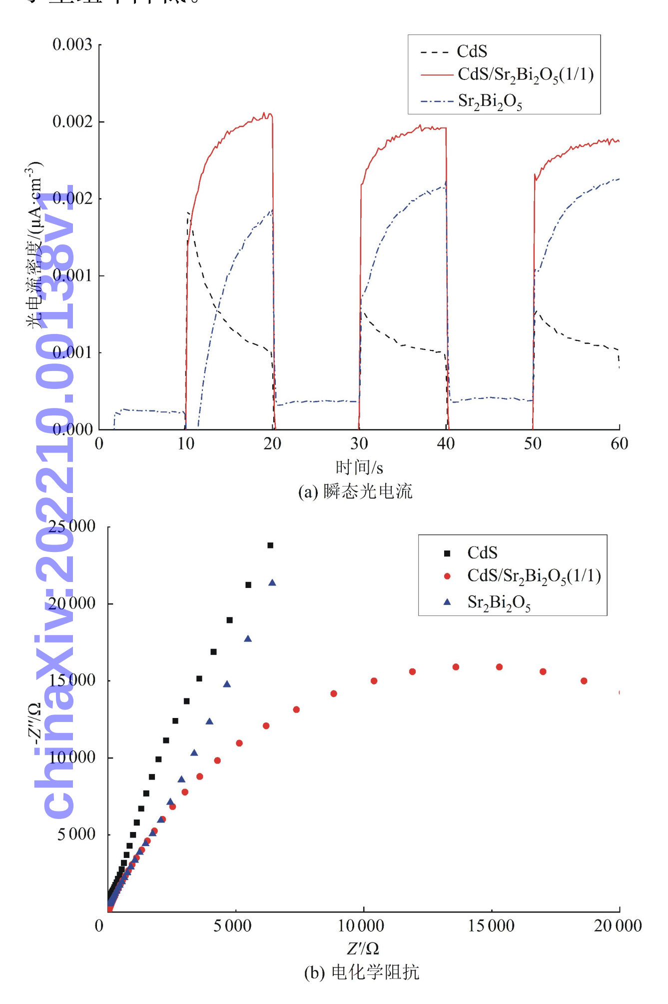


图 7 单相及 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$(1/1)的瞬态光电流和电化学阻抗

催化剂的带边位置在光生载流子分离过程中起关键作用[18]。$Sr_2Bi_2O_5$ 和 CdS 的导带电势和价带电势分别为[19-20]

$$E_{CB}=X-E_e-0.5E_g, \tag{2}$$

$$E_{VB}=E_{CB}+E_g, \tag{3}$$

其中：E_e 为标准氢电极(4.5 eV)中自由电子的能量；X 为半导体的绝对负电性。CdS、$Sr_2Bi_2O_5$ 的 X 值分别为 4.795、6.345 4 eV，测得 CdS、$Sr_2Bi_2O_5$ 的 E_g 分别为 1.91、2.60 eV。根据式(2)、(3)，CdS 的 E_{CB}、E_{VB} 的计算值分别为 −0.66、1.25 eV，$Sr_2Bi_2O_5$ 的 E_{CB}、E_{VB} 分别为 0.545 4、3.145 4 eV(见图 8(a))。在图 8(b)中，CdS 和 $Sr_2Bi_2O_5$ 的费米能级电势都分别靠近各自的价带且费米能级电势有差异，复合后两者费米能级互相向对方移动，最终到达一个介于两者之间的位置，同时两者会发生电子空穴交换。在可见光的照射下，$Sr_2Bi_2O_5$ 价带的电子从价带跃迁到导带产生光生电子，由于 $Sr_2Bi_2O_5$ 导带底层的电势高于 CdS 导带底层电势，光生电子由 CdS 和 $Sr_2Bi_2O_5$ 耦合的界面传向 CdS 的导带，而 CdS 价带顶层电势低于 $Sr_2Bi_2O_5$ 价带顶层电势，空穴经过两者耦合界面从 CdS 价带流向 $Sr_2Bi_2O_5$ 价带，从而能够快速分离电子空穴对，并有效抑制载流子复合，同时在表面流动过程中空穴可将 MB 降解。因此，实验过程中，主要的光催化活性物质是 h^+，这与图 6(d)中的捕获实验分析结果一致。

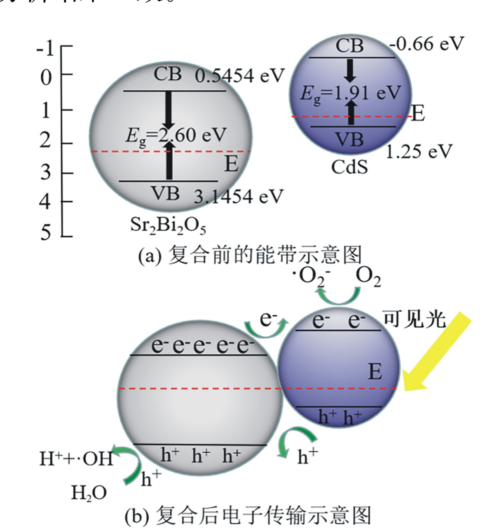


图 8 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂的能带能级和电子传输过程

3 结束语

在固相烧结法制备出单相 $Sr_2Bi_2O_5$ 的基础上，采用沉淀法成功合成出具有不同摩尔比的 $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂。通过对所制样品进行结构表征和光催化性能测试发现：

1) $CdS/Sr_2Bi_2O_5$ 复合光催化剂由 CdS + $Sr_2Bi_2O_5$ 两相组成，形貌为团聚状的 $Sr_2Bi_2O_5$ 颗粒附着在不规则的 CdS 颗粒上。两相表面紧密接触在一起，形成明显的界线，相互耦合形成异质结。

2) CdS 和 $Sr_2Bi_2O_5$ 摩尔比为 1∶1的复合体系具有最优的光催化性能，光照 40 min 对 MB 的降解效率为 95%，3 次循环试验后稳定性较好。显著改善的光催化性能主要归因于复合光催化剂中在 CdS 与

$Sr_2Bi_2O_5$ 两相之间形成了异质结，加快光生电子空穴对分离的同时，还能有效抑制光生电子空穴对的复合。

参考文献：

[1] MARSCHALL R. Semiconductor composites: strategies for enhancing charge carrier separation to improve photocatalytic activity[J]. Advance Functuntion Material, 2014, 24: 2421-2440.

[2] SHINDE P S, PARK J W, MAHADIK A M, et al. Fabrication of efficient CdS nanoflowers-decorated TiO_2 nanotubes array heterojunction photoanode by a novel synthetic approach for solar hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 14: 21078-21087.

[3] VILLA K, DOMENECH X, GARCE-PEREZ U M, et al. Photocatalytic hydrogen production under visible light by using a CdS/WO_3 composite[J]. Catalysis Letters, 2015, 146: 100-108.

[4] REDDY Lakshmana N, EMIN S, VALANT M, et al. Nanostructured Bi_2O_3 @ TiO_2 photocatalyst for enhanced hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42: 6627-6636.

[5] SONG N N, ZHANG M H, ZHOU H, et al. Synthesis and properties of Bi_2WO_6 coupled with SnO_2 nano-microspheres for improved photocatalytic reduction of Cr^{6+} under visible light irradiation[J]. Applied Surface Science, 2019, 495: 143551.1-143551.9.

[6] CHEN Z X, WANG J T, XING R, et al. Preparation of carbon-supported CdS photocatalysts with high performance of dye photodegradation using cadmium-enriched Perilla frutescens biomass[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2019, 109: 107559.

[7] WANG D, LIU J Z, ZHANG M, et al. Construction of ternary annular 2Z-scheme + 1 heterojunction $CuO/WO_3/CdS$ photocatalytic system for methylene blue degradation with simultaneous hydrogen production[J]. Applied Surface Science, 2019, 498: 143843.

[8] JANBANDHU S Y, JOSHI A, MUNISHWAR S R, et al. CdS/TiO_2 heterojunction in glass matrix: Synthesis, characterization, and application as an improved photocatalyst[J]. Applied Surface Science, 2019, 497: 143758.1-143758.11.

[9] DENG Y X, XIAO Y F, ZHOU Y, et al. A structural engineering-inspired CdS based composite for photocatalytic remediation of organic pollutant and hexavalent chromium[J]. Catalysis Today, 2019, 335: 101-109.

[10] DENG F, LU X Y, LUO Y B, et al. Novel visible-light-driven direct Z-scheme $CdS/CuInS_2$ nanoplates for excellent photocatalytic degradation performance and highly-efficient Cr(VI) reduction[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 361: 1451-1461.

[11] HU Z, LYU J C, GE M. Role of reactive oxygen species in the photocatalytic degradation of methyl orange and tetracycline by Ag_3PO_4 polyhedron modified with $g\text{-}C_3N_4$[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2020, 105: 104731.

[12] SU Q L, LI W, GAO P D, et al. Fabrication of $Ag_2CO_3/SrCO_3$ rods with highly efficient visible-light photocatalytic activity[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46: 312-316.

[13] ZHONG L S, HU C H, ZHUANG J, et al. $AgBr/MgBi_2O_6$ heterostructured composites with highly efficient visible-light-driven photocatalytic activity[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2018, 117: 94-100.

[14] WANG X L, LIU L, AN H T, et al. $(Sr_{0.6}Bi_{0.305})_2Bi_2O_7$ as a new visible-light-responsive photocatalyst: an experimental and theoretical study[J]. Materials Research Bulletin, 2019, 118: 110484.

[15] LUO D, HUANG Y F, ZHAO Y Z, et al. Visible-light-driven $HSr_2Nb_3O_{10}/CdS$ heterojunctions for high hydrogen evolution activity[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45: 2896-2908.

[16] JI S T, WANG Q Q, ZHOU J, et al. Synthesis of a Ag/AgCl/PLA membrane under electron beam irradiation for the photocatalytic degradation of methylene blue and chloramphenicol[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, 31(2): 1-12.

[17] ENESCA A, ISAC L. The influence of light irradiation on the photocatalytic degradation of organic pollutants[J]. Materials, 2020, 13(11): 2494.

[18] GUO H N, ZHANG C G, WEN L, et al. Construction of direct Z-Scheme $AgI/Bi_2Sn_2O_7$ nanojunction system with enhanced photocatalytic activity: accelerated interfacial charge transfer induced efficient Cr(VI) reduction, tetracycline degradation and escherichia coli inactivation[J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2018, 6: 8003-8018.

[19] KRETSCHMER I, SENN A M, MEICHTRY J M, et al. Photocatalytic reduction of Cr(VI) on hematite nanoparticles in the presence of oxalate and citrate[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019, 242: 218-226.

[20] NGULLIE R C, ALASWAD S O, BHUVANESWARI K, et al. Synthesis and characterization of efficient $ZnO/g\text{-}C_3N_4$ nanocomposites photocatalyst for photocatalytic degradation of methylene blue[J]. Coatings, 2020, 10(5): 500.

编辑：张所滨